

1-8-2019

## Modeling and Simulation of Initial Loading Balls and Replenishing Balls of the Duplex Inlet & Outlet Coal Mill

Junjie Gu

*School of Energy Power and mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;*

Yukun Wang

*School of Energy Power and mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;*

Zhizhong Bai

*School of Energy Power and mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Modeling and Simulation of Initial Loading Balls and Replenishing Balls of the Duplex Inlet & Outlet Coal Mill

### Abstract

**Abstract:** To solve the problems of excess of abrasion of steel balls and high power consumption used for grinding of the duplex inlet & outlet coal mill, a method that can calculate the initial balls loading, the period and quantity of adding balls for the mill is presented on the basis of building up the models of steel balls' abrasion and motion. *Setting #E coal mill as example, period and quantity of adding balls are confirmed accurately in consideration of variation of power, the maximum capacity and fineness of coal powder, compensatory quantity of each grade of balls are also calculated.* Results of comparison with #B coal mill which uses traditional initial loading balls and adding balls method show that the abrasion of steel balls and consumption of power of #E coal mill is lower than #B coal mill obviously, so that the economic benefit of power plant is significantly improved.

### Keywords

steel ball abrasion, ball replenishing period, ball replenishing matching, pulverized coal-fineness, economic benefit

### Recommended Citation

Gu Junjie, Wang Yukun, Bai Zhizhong. Modeling and Simulation of Initial Loading Balls and Replenishing Balls of the Duplex Inlet & Outlet Coal Mill[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3340-3350.

# 双进双出磨煤机初装球与补装球建模与仿真

谷俊杰, 王玉坤, 白智中

(华北电力大学(保定)能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071000)

**摘要:** 为解决双进双出磨煤机钢球损耗和磨煤电耗高的问题, 在构建钢球的运动仿真模型和磨损仿真模型的基础上, 提出了一种确定磨煤机初装球量和精准补装钢球周期、装球量和级配的方法。以某机组#E磨为例, 经过少球改造后, 根据装球量变化引起的功率、最大出力和煤粉细度变化精准确定了补装球周期和补装球量, 求出各级钢球合理的补充量。与采用传统初装球和补装球方法的#B磨进行对比, 结果表明, #E磨钢球损耗和磨煤电耗明显低于#B磨, 显著提高了电厂的经济效益。

**关键词:** 钢球磨损; 补装球周期; 钢球级配; 煤粉细度; 经济效益

中图分类号: TM621.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 09-3340-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809015

## Modeling and Simulation of Initial Loading Balls and Replenishing Balls of the Duplex Inlet & Outlet Coal Mill

Gu Junjie, Wang Yukun, Bai Zhizhong

(School of Energy Power and mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

**Abstract:** To solve the problems of excess of abrasion of steel balls and high power consumption used for grinding of the duplex inlet & outlet coal mill, a method that can calculate the initial balls loading, the period and quantity of adding balls for the mill is presented on the basis of building up the models of steel balls' abrasion and motion. *Setting #E coal mill as example, period and quantity of adding balls are confirmed accurately in consideration of variation of power, the maximum capacity and fineness of coal powder, compensatory quantity of each grade of balls are also calculated.* Results of comparison with #B coal mill which uses traditional initial loading balls and adding balls method show that the abrasion of steel balls and consumption of power of #E coal mill is lower than #B coal mill obviously, so that the economic benefit of power plant is significantly improved.

**Keywords:** steel ball abrasion; ball replenishing period; ball replenishing matching; pulverized coal-fineness; economic benefit

## 引言

燃煤电厂制粉系统用于原煤的研磨和干燥, 并将满足细度要求的煤粉输送至锅炉进行燃烧, 其

运行状态直接影响锅炉燃烧质量和机组的安全经稳定运行<sup>[1]</sup>。双进双出磨煤机是直吹式制粉系统的主体设备, 具有对锅炉负荷变化响应迅速, 出力和煤粉细度稳定, 煤种适应性强, 对原煤中的杂物不敏感等优点, 因而在国内外燃煤电厂中得到了广泛应用<sup>[2-4]</sup>。但是双进双出磨煤机存在着初装球量过大, 补装球规则不合理, 钢球消耗量大, 磨煤电耗高的问题。如何降低双进双出磨煤机电耗与钢耗是



收稿日期: 2017-01-06 修回日期: 2017-03-03;  
基金项目: 河北省教育厅科学研究指导性项目 (z2012011);  
作者简介: 谷俊杰(1959-), 男, 河北定州, 硕士, 教授, 研究方向为电站热工控制与优化运行; 王玉坤(1991-), 男, 河北, 硕士生, 研究方向为电站热工控制与运行优化。

<http://www.china-simulation.com>

• 3340 •

人们关心的热点问题。保持磨煤机筒内合理的的装载量与级配是补装球规则中最关键的两点。磨煤机开始连续工作以后, 钢球不断被磨损因而装载量逐渐降低。因而运行人员必须按照一定的补装球规则补装钢球以补偿钢球的损失, 保证磨煤机经济稳定运行。我国大多数电厂按照经验公式初装球, 运行一段时间以后根据经验进行补装球。然而这种方法的针对性和准确性较差, 缺乏理论指导。为了实现双进双出磨煤机补装球更好的管理与控制, 保证制粉系统安全经济与稳定运行, 就必须确定合理的初装球量, 并精确定补球周期和补球级配。

很多学者对于钢球磨损规律与磨煤机节能降耗进行了研究。段希祥等<sup>[5]</sup>在简单装补球方法和合理平衡装补球基础上, 利用矿石破碎力学原理及戴维斯钢球运动理论, 推导出适合我国国情的球径半理论公式, 并提出精确化装补球方法。谢恒星等<sup>[6]</sup>建立了基于钢球磨损动力学的基本模型, 并推导出不同磨矿条件对钢球磨损的影响规律的回归方程。岳俊锋等<sup>[7]</sup>经实验分析了钢球加载量和级配对于磨煤机出力、煤粉细度和磨煤电耗的影响。刘正雄<sup>[8]</sup>建立了钢球磨损规律模型, 并采用了差分进化算法辨识模型

中参数, 预测了不同直径钢球的变化情况。Bwalya M M 等<sup>[9]</sup>提出了理论上可计算任何工况任意给定时间磨煤机内装载量的计算公式。这些模型为钢球耗损的预计和补装球控制提供了理论支持, 但国内外对外如何精确定双进双出磨煤机补球周期、补装球量与补球级配, 并降低磨煤机能耗方面鲜有研究。

笔者综合考虑了钢球的冲击、磨剥、摩擦和疲劳对于钢球磨损的影响, 推导了钢球损耗率理论计算式。以某电厂#2 机组两台 BBD-4366 双进双出磨煤机为例, 利用 MATLAB/Simulink 模块对磨煤机功率变化进行仿真, #B 磨采用中铬钢球按理论公式初装球, 并根据经验进行补装球; #E 磨进行少球改造, 并结合钢球损耗、煤粉细度以及出力变化提出一种精确定补装球周期和补球量的方法, 根据各级钢球分布比例变化推导出钢球磨损稳态特性矩阵用以计算补装球比例。运行数据表明, #E 磨磨煤电耗和钢耗明显低于#B 磨, 显著提高了运行效益。

## 1 磨煤机运行参数

双进双出磨煤机制粉系统如图 1 所示。

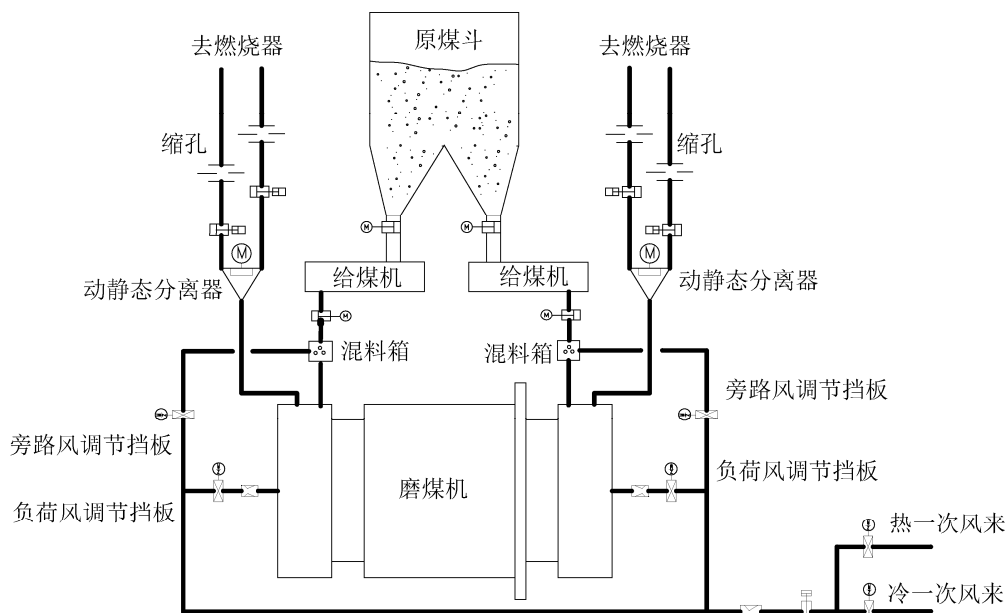


图 1 双进双出磨煤机制粉系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coal-pulverizing system with the duplex inlet & outlet coal mill

双进双出钢球磨煤机有两个对称的回路，原煤经旁路风干燥后从筒体两端进入磨煤机。钢球被筒体带动升到一定高度后在重力作用下下落，原煤通过钢球的冲击、钢球与钢球间对原煤的碾磨、钢球与筒体内护甲对原煤的碾磨作用被磨成煤粉。负荷风对煤粉进一步干燥并携带煤粉从筒体两端流出进入分离器进行分离，合格煤粉进入锅炉炉膛进行燃烧，不合格煤粉经回粉管、落煤管返回筒体再次碾磨。在给定负荷下，若要改变磨煤机出力，只需改变一次风量即可，而风煤比始终保持不变<sup>[10]</sup>。因此双进双出磨煤机在较宽的负荷范围内有快速反应能力，每分钟变化率超过 20%。

某电厂采用 MGS4366 型双进双出钢球磨煤机。磨煤机基本参数如表 1 所示，实际使用煤种、设计煤种和校核煤种参数如表 2 所示。

表 1 BBD-4366 型双进双出磨煤机基本参数

Tab. 1 Basic parameters of BBD-4366 type coal ball mills with double inlets and outlets

项目	数值
有效直径/mm	4 250
有效长度/mm	6 740
筒体容积/m <sup>3</sup>	95.62
装球量一般范围/t	54~97
煤粉细度 R <sub>90</sub> /%	9
最佳转速率	0.78
分离器类型	动静态分离器
电动机转速/r·min <sup>-1</sup>	985

表 2 煤种的参数

Tab. 2 Quality parameters of coal

项目	实际煤种	设计煤种	校核煤种
M <sub>t</sub> /%	7.43	6.91	5.60
A <sub>d</sub> /%	20.4	24.40	25.52
V <sub>daf</sub> /%	12.7	9.84	18.19
Q <sub>ar net</sub> /MJ·kg <sup>-1</sup>	23.3	23.06	22.00
HGI	55	60	87
相对密度	1.80	1.82	1.80

## 2 钢球的磨损仿真建模

### 2.1 钢球的运动仿真建模

筒内钢球的运动状态可分为泻落式、抛落式和离心式三种，其随筒体转速的变化而变化，其中钢球抛落式运动下用于磨煤的能量最多，磨煤效率最高<sup>[11]</sup>。钢球在筒体内的抛落运动如图 2 所示。

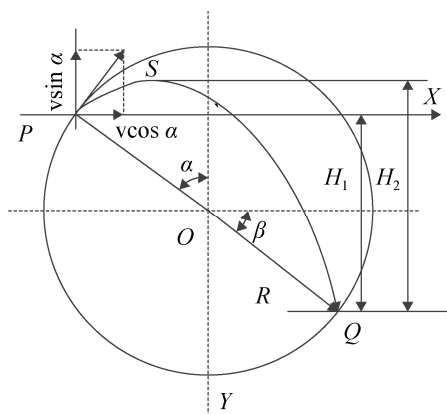


图 2 筒体内钢球的运动

Fig. 2 Motion of the steel balls in the tube

钢球在筒体内的抛落运动可分为两个步骤：

(1) 钢球在衬板与钢球的摩擦力、钢球的自身重力以及筒体旋转产生的离心力作用下，随着筒体做圆周运动，同时绕着自身的轴线旋转；

(2) 钢球运动到 P 点时，在 P 点以一定的速度抛落至 Q 点，P-S-Q 即为抛落轨迹。

磨煤机筒体的临界转速为：

$$n_c = \frac{42.4}{\sqrt{D}} = 20.57 \text{ r/min} \quad (1)$$

式中：D 为筒体的有效直径，m。

R<sub>0</sub> 为任意一层钢球的球心距离筒体轴心的距离，则磨煤机筒体的转速率：

$$\phi = \frac{n}{n_c} = \frac{42.4\sqrt{\cos\alpha_0}}{\sqrt{2R_0}} \bigg/ \frac{42.4}{\sqrt{2R_0}} = \sqrt{\cos\alpha_0} \quad (2)$$

式中：n 为筒体实际转速，r/min；α<sub>0</sub> 为脱落角。

P 点钢球的抛落时的速度可由式 (3) 计算而得：

$$\frac{m_i v^2}{R_0} = m_i g \cos\alpha_0 \quad (3)$$

式中:  $v$  为钢球运动的线速度, m/s,  $m_i$  为某一直径钢球的质量, kg。

当钢球从  $P$  点经  $S$  点抛落到  $Q$  点时, 钢球的水平与垂直位移为<sup>[12]</sup>:

$$H_x = 4R_0 \sin \alpha_0 \cos^2 \alpha_0 \quad (4)$$

$$H_1 = -4R_0 \sin^2 \alpha_0 \cos \alpha_0 \quad (5)$$

## 2.2 钢球的磨损仿真建模

球磨机钢球磨损分为机械磨损和腐蚀磨损两部分。原煤研磨过程属于干磨, 实际煤种含水量较少, 且旁路风对原煤进行的干燥预处理进一步降低水分, 故腐蚀磨损可忽略不记。因此, 双进双出磨煤机钢球的磨损主要为机械磨损, 是由冲击、磨剥、摩擦以及金属表面疲劳等作用共同引起的<sup>[13]</sup>。

在原煤的研磨过程中, 钢球和原煤、钢球和衬板、钢球和钢球之间的的冲击碰撞过程伴随着能量的转移与消耗, 大部分冲击能量消耗在了钢球的磨损和破坏上, 并以声能、热能等形式发生耗散。钢球的冲击磨损可用公式(6)计算:

$$L_{1i} = k_1 \left( \frac{1}{2} m_i v^2 + m_i g H_1 \right) \quad (6)$$

式中:  $L_{1i}$  为质量为  $m_i$  钢球的冲击磨损质量, g;  $k_1$  为冲击磨损和钢球动能的比例系数。

文献[8]提出钢球的磨剥磨损与钢球的表面积和钢球切向上的运动速度成正比。原煤研磨处于干燥环境下, 且煤粉易于流动, 煤粉黏度对于钢球运动的影响可忽略不计, 故对原公式进行简化:

$$L_{2i} = k_2 \lambda S_i v_t = k_2 \lambda S_i \left( \frac{\pi n_b d_i}{60} \right) = k_2 m_i \quad (7)$$

式中:  $L_{2i}$  为质量为  $m_i$  钢球的磨剥磨损质量, g;  $\lambda$  为比磨剥磨损的比表面积;  $S_i$  为直径为  $d_i$  的钢球表面积,  $m^2$ ;  $v_t$  为钢球的运动速度, r/min;  $n_b$  为钢球转速, r/min;  $k_2$  为磨剥磨损与钢球质量的比例系数。

由于钢球表面存在一定的粗糙度, 原煤只与钢球表面部分微小突起处发生磨剥, 故取  $\lambda=0.2$ <sup>[8]</sup>。

实际选用原煤对研磨部件的磨损程度很强, 研磨难度较大, 因而需考虑原煤与钢球的摩擦导致的表面材料损耗引起的磨料磨损。磨料磨损以表面材

料的擦伤、沟纹和条痕等形式为主, 与原煤和钢球的机械性能有关。

在磨煤机运转过程中, 钢球表面发生了以点蚀和剥落为主要形式的疲劳磨损。根据位错理论, 钢球在剪切力的作用下, 次表面发生位错运动, 而表层存着应力滞后的现象。次表面的位错的加剧与积累形成空洞和裂纹, 最终折向表面形成点蚀。表面疲劳磨损与钢球表面积的  $3/2$  次方成正比。

在实际工程应用中, 由于磨料磨损和疲劳磨损所占比例较小, 一般可将二者归纳到磨剥磨损之中。综上, 采用叠加原理计算钢球的总磨损量为:

$$\frac{dG_{on}}{dt} = - \sum_{i=1}^n n_i (L_{1i} + L_{2i}) \quad (8)$$

式中:  $n$  为钢球分级数;  $n_i$  为第  $i$  级钢球个数。

带入(6)~(7)可得:

$$\frac{dG_{on}}{dt} = - \sum_{i=1}^n n_i m_i \left( k_1 \left( \frac{1}{2} v^2 + g H_1 \right) + k_2 \right) - G_m \left( k_1 \left( \frac{1}{2} v^2 + g H_1 \right) + k_2 \right) \quad (9)$$

带入边界条件  $m_{i|t=0} = m_i$  可得:

$$G_{on}(t) = G_m \exp \left[ - \left( k_1 \left( \frac{1}{2} v^2 + g H_1 \right) + k_2 \right) t \right] = G_m \exp(-kt) \quad (10)$$

式中:  $k = \left( \frac{1}{2} v^2 + g H_1 \right) k_1 + k_2$ 。

通过公式(10)可知, 钢球的磨损量随时间呈指数增长, 且磨损速率随着时间的增长而降低。

设每隔时间  $t$  补装质量为  $G_g$  的钢球, 则筒内装载量  $G_{on}$  可用式(11)表示:

$$G_{on} = G_m \exp(-knt) + G_g + G_g \exp(-kt) + G_g \exp(-2kt) + \dots + G_g \exp(-nkt) \quad (11)$$

假设钢球可以磨损至零, 则:

$$G_{on} = \frac{G_g}{1 - \exp(-kt)} \quad (12)$$

## 3 初装球和精准补装球仿真与计算

### 3.1 初装球量和钢球磨损率仿真与计算

某电厂#2 机组锅炉配备#A~#F 共计 6 台双进

双出钢球磨煤机煤机,其中#F磨备用。#B磨采用传统初装球和补装球方法, #E磨经过少球改造,采用铬锰钨钢球代替原有中铬钢球,并对装载量与装球级配进行优化。铬锰钨钢球属于高铬钢球,硬度大,内外层硬度偏差小,失圆率低。因此新钢球具有很强的耐磨性和磨损均匀性,克服了传统中铬磨球的诸多缺点。少球改造技术在保证出力和煤粉细度下,降低磨煤机电耗和研磨部件磨损程度,降低了机组运行成本。

磨煤机内钢球的级配对于制粉效率至关重要,理论上磨煤机制粉能力与钢球表面积呈线性关系,因而同等质量小钢球的制粉效果要优于大钢球。但由于原煤中存在一定量的粗煤粒,且原煤中存在着石英等高硬度杂质,必须配备一定比例的大钢球。

### 3.1.1 #B磨初装球量和钢球磨损率计算

该电厂#B磨采用中铬钢球以 $\phi 30:\phi 40:\phi 50=1:1:1$ 的比例进行初装球。

钢球的最佳钢球充满系数为:

$$\psi_{zj} = \frac{0.12}{\phi_{zj}^{1.75}} = \frac{0.12}{(n/n_c)^{1.75}} = 0.1853 \quad (13)$$

所以, #B磨钢球的最佳装载量为:

$$G_{zj} = V\rho\psi_{zj} = \frac{\pi D^2 L}{4} \rho\psi_{zj} = 86.83 \text{ t} \quad (14)$$

式中:  $\rho$  为钢球的堆积密度,  $\rho=4.9 \text{ t/m}^3$ 。

2016年6月#B磨补装球记录如表3所示。

表3 #B磨补装球记录

Tab. 3 Records of balls replenishing of #B coal mill

日期	时间	加球量/个
2016/06/04	13:59:23	1 000
2016/06/10	14:23:50	1 000
2016/06/15	14:37:04	1 000
2016/06/17	15:13:59	1 000
2016/06/22	13:01:51	1 000
2016/06/24	18:02:07	1 000
2016/06/30	10:15:01	1 000

表3中记录的497.3 h内, #B磨平均出力43.2 t/h, 运行人员在磨煤机电流偏小时补装的每次只补装

$\phi 50$  钢球, 每个钢球质量为 514 g, 钢球补装球时间间隔无限制。视钢球补充量等于磨损量, 即:

$$G_g = G_{abr} \quad (15)$$

式中:  $G_g$  为钢球补充量, t;  $G_{abr}$  为钢球磨损量, t。

由式(10)计算可知, #B磨钢球磨损系数  $k_B=5.838 \times 10^{-5}$ 。

磨煤机装载量的单位时间变化量为:

$$\Delta G_{on} = (G_{on}(t+D_t) - G_{on}(t))/D_t \quad (16)$$

式中:  $D_t$  为时间步长, h。

由于  $k_B$  值很小, 故时间间隔较短时可近似认为磨损量随时间线性增加, 故当磨煤机出力为  $B_m$  时, 钢球损耗为:

$$Y_1 = \frac{\Delta G_{on}}{B_m D_t} = \frac{6000 \times 514}{43.2 \times 497.3} \text{ g/t} = 143.55 \text{ g/t} \quad (17)$$

### 3.1.2 #E磨初装球量和钢球磨损率计算

#E磨经过少球改造后的初装球量为:

$$G_m = aG_{zj} \quad (18)$$

式中:  $a$  为装载量修正系数, 取值范围为[0.5,0.6], 实际工程应用中可根据实际运行情况进行调整。

为兼顾大钢球对原煤的冲击和小钢球高效研磨能力, 经多次试验后, #E磨以 $\phi 25:\phi 30:\phi 40:\phi 50:\phi 60=35:30:15:10:10$ 的比例进行初装球, 装载量为 45 t, 故  $a=0.52$ 。

#E磨以 55.0 t/h 出力运行 1 632 h 后, 对各级钢球磨损程度进行采样检测, 检测结果见图 3。

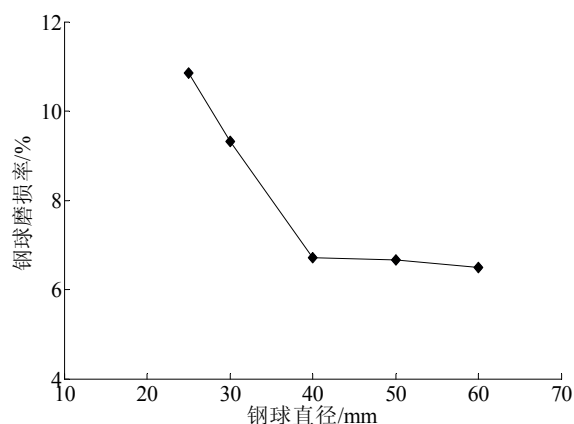


图3 钢球磨损率与直径关系

Fig. 3 Relationship between proportion of abrasion and diameter of steal ball

由曲线可知, 小钢球磨损率大于大钢球。这是因为同等质量小钢球表面积大, 增加了与原煤、其他钢球以及衬板的接触, 增大了磨损面积。

根据式(10)可求得各级钢球钢球磨损系数  $k$  分别为  $7.03 \times 10^{-5}$ ,  $5.99 \times 10^{-5}$ ,  $4.26 \times 10^{-5}$ ,  $4.23 \times 10^{-5}$ ,  $4.12 \times 10^{-5}$ , 则#E 磨筒内所有钢球  $k_E$  值为:

$$k_E = (7.03 \times 0.35 + 5.99 \times 0.30 + 4.26 \times 0.15 + 4.23 \times 0.10 + 4.12 \times 0.10) \times 10^{-5} = 5.73 \times 10^{-5}$$

将  $k_E$  带入式(10)得钢球消耗量为 4.01 t, 则钢球单耗为:

$$Y_2 = \frac{G_{abr}}{B_m t} = \frac{4.01 \times 10^6}{55 \times 1632} \text{ g/t} = 44.67 \text{ g/t} \quad (19)$$

由于  $Y_1 > Y_2$ , 故#E 磨所装填的高铬钢球磨损率小于#B 磨装填的中铬钢球。

### 3.2 补装球周期影响因素及仿真计算

在装补球过程中应保证筒内有最高的破碎概率和单体解离度, 同时应考虑实际操作的方便性与可行性, 故补球周期不应超过钢球磨损量达到初装球量的 5% 所对应的时间  $T_1$ <sup>[14]</sup>。

$$T_1 = \frac{0.05 G_m}{Y B_m} \times 10^6 \quad (20)$$

#### 3.2.1 磨煤机功率

双进双出磨煤机的磨煤功率  $P_m$  是指该台磨煤机制备煤粉所消耗的电功率, 可表示为:

$$P_m = P_1 + P_2 \quad (21)$$

式中:  $P_1$  为磨煤机的空载功率, kW;  $P_2$  为磨煤机的有效功率, kW。

空载功率是指在磨煤机筒内无煤条件下驱动筒体转动消耗的功率, 一般认为磨煤机筒内每增加 1 t 钢球增加的空载功率是一个定值<sup>[14]</sup>, 即:

$$\alpha = \frac{P_{1a} - P_{1b}}{G_{ma} - G_{mb}} \quad (22)$$

式中:  $G_{ma}$ 、 $G_{mb}$  为两次试验钢球装载量, t;  $P_{1a}$ 、 $P_{1b}$  为试验中不同装载量下对应的空载功率, kW。

不同装载量下磨煤机空载功率如图 4 所示。

根据曲线可求得  $\alpha = 14.45 \text{ kW/t}$ 。

有效功率是指在筒体载有一定量煤粉条件下消耗在煤粉运动的功率。在一定运行工况下, 用于转动 1 t 煤粉所消耗的电功率可视为常数<sup>[14]</sup>, 即:

$$\beta = \frac{P_{2a} - P_{2b}}{B'_{ma} - B'_{mb}} \quad (23)$$

式中:  $B'_{ma}$ 、 $B'_{mb}$  为两次试验磨煤机出力, t/h;  $P_{2a}$ 、 $P_{2b}$  为试验中不同出力下对应的功率, kW。

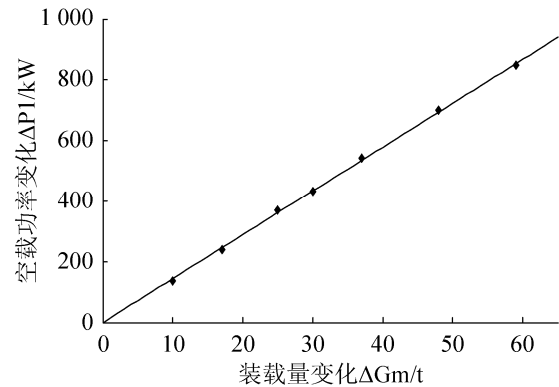


图 4 磨煤机空载功率随装载量变化曲线

Fig. 4 Curve of variation of no load power of coal mill following with load

不同功率下磨煤机功率变化曲线如图 5 所示。

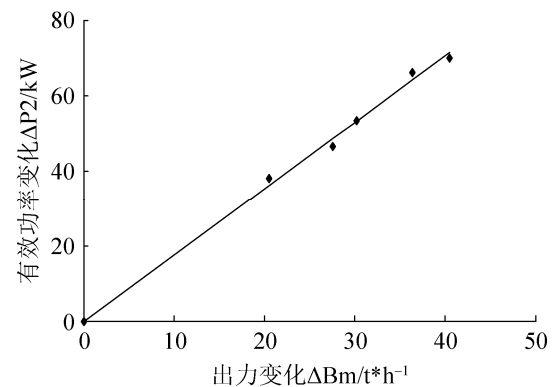


图 5 磨煤机有效功率随出力变化曲线

Fig. 5 Curve of variation of effective power of coal mill following with capacity

根据曲线可求得  $\beta = 1.76 \text{ (kW} \cdot \text{h)/t}$ 。

由此可知, 双进双出磨煤机大部分能量消耗在筒体转动和钢球提升上, 与磨煤机出力几乎无关。

利用 MATLAB/Simulink 模块对磨煤机功率变化进行建模和仿真。假定#B 磨出力和磨损率均不变, #B 磨磨煤功率的变化仿真曲线见图 6。



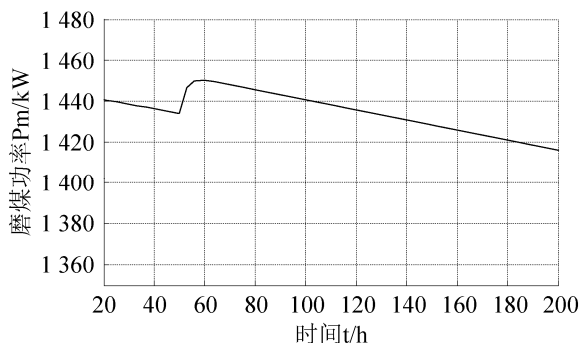


图6 磨煤机功率随时间变化仿真曲线

Fig. 6 Simulation curve of power varying with time

当#B磨出力增加10%时, #B磨功率仿真曲线可用图7表示。

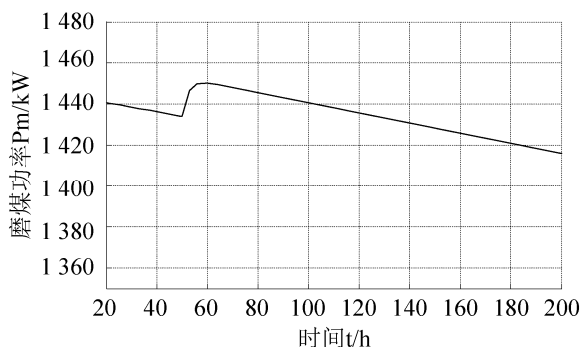


图7 磨煤机功率在出力增加10%时随时间变化仿真曲线

Fig. 7 Simulation curve of power varying with time under 10% increase of mill capacity

由图6~7可知,在理想条件下磨煤机功率随时间呈线性变化。

由公式和仿真曲线可知,磨煤机功率变化只与装载量和出力有关,即:

$$\Delta P_m = \alpha \Delta G_m + \beta \Delta B_m \quad (24)$$

当磨煤机出力稳定时,最大功率允许降低:

$$\Delta P_{max} = 0.05 \alpha G_m = 0.05 \times 14.46 \times 45 \text{ kW} = 32.535 \text{ kW}$$

令  $\Delta P_m = 32.535 \text{ kW}$  时对应时间为  $T_2$ , 则当磨煤机出力和钢球磨损率不变时,理论上存在  $T_2 = T_1$ 。

我国入厂原煤产地众多,主要参数波动范围大,煤种的差异给制粉系统运行带来一系列问题<sup>[15]</sup>。因此根据磨煤机功率变化间接判断钢球装载量和磨煤机出力的变化具有明显优势。

### 3.2.2 磨煤机最大出力

运行后期,由于磨煤机衬板的磨损,失效小球比例增大,磨煤机最大出力降低,对锅炉负荷变化响应能力降低。BBD型磨煤机的最大出力可近似用式(25)计算<sup>[16]</sup>:

$$B_{max} = B_{M0} \times f_e \times f_H \times f_R \times f_M \times f_G \quad (25)$$

式中:  $B_{M0}$  为磨煤机基本出力, t/h;  $f_H$ 、 $f_R$ 、 $f_M$ 、 $f_G$  和  $f_e$  分别为原煤可磨性、煤粉细度、原煤水分、钢球装载量和研磨部件磨损对出力的修正系数。

根据我国双进双出磨煤机制粉系统设计修正系数, #B磨  $B_{M0} = 82 \text{ t/h}$ ,  $f_e = 0.95$ ,  $f_H = 1.090$ ,  $f_R = 0.683$ ;  $f_G = 0.935$ ,  $f_M = 1.0$ 。因此#B磨研磨出力为:

$$B_{max} = 82 \times 1.090 \times 0.683 \times 0.935 \times 0.95 \times 1.0 \text{ t/h} = 54.22 \text{ t/h}$$

#E磨经实际测量最大出力约为 56.27 t/h。计算结果表明#E磨经少球改造后最大出力提升,磨煤机的制粉能力增加。

由式(25)可知,双进双出磨煤机最大出力只与原煤可磨性系数 HGI、原煤和煤粉水分、煤粉细度和钢球装载量有关,而煤粉细度和磨煤机出力成正比。因此在运行过程中,应保证磨煤机足够响应负荷能力。

### 3.2.3 煤粉细度

煤粉细度对于煤粉气流的着火和焦炭的燃尽有直接影响。在实际运行中把机械不完全燃烧热损失和制粉电耗、钢耗之和的最小值对应的  $R_{90}$  称之为最佳煤粉经济细度。我国专家学者经多年研究得出煤粉经济细度计算公式为:

$$R_{90} = 4 + 0.5nV_{daf} = 10.985 \quad (26)$$

该电厂考虑煤粉均匀性,经过实验证明按照公式(27)计算的煤粉细度运行,飞灰可燃物降低带来的燃烧效益和飞灰综合利用率的提高大于磨煤机电耗和钢耗的增加:

$$R_{90} = 0.5nV_{daf} = 6.985 \quad (27)$$

运行人员于 2016-07-10T14:15:22、2016-07-25 T 13:18:17 和 2016-08-09 T 10:25:45 对#B磨煤机细度进行检测,并于 8月7日 15:23 补装  $\phi 50$  钢

球 1 000 个。检测结果如图 8 所示。

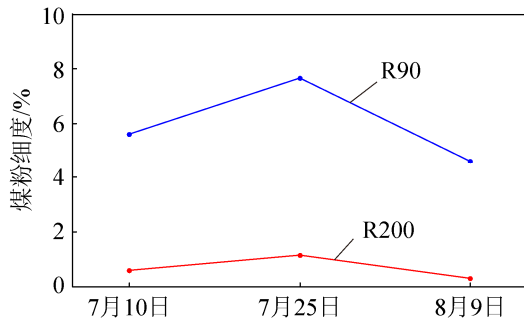


图 8 钢球磨损与补装球前后煤粉细度变化

Fig. 8 Variation of coal powder fineness with abrasion and replenish of steel balls

由于双进双出磨煤机在稳定运行过程中,筒体内的燃料量和风煤比始终保持不变,可长期稳定地锅炉输送合格的煤粉,因此双进双出磨煤机可制备高细度煤粉,保证锅炉火焰稳定性。

随着磨煤机连续运行过程中钢球损耗,  $R_{90}$ 、 $R_{200}$  均有所提高。当进行补装球后,煤粉细度显著降低。从数值上看,  $R_{90}$  在钢球磨损过程中提高 36.75%, 在补球后降低 39.63%, 而  $R_{200}$  分别为 91.67% 和 73.91%。由此可知,当钢球装载量在合理范围内变化时,粗煤粉变化幅度大于细煤粉,且煤粉细度一般可以满足锅炉燃烧需求。

运行过程中应对煤粉细度进行严格检测,保证煤粉细度保持在 6.985 左右,最高不应长时间超过经典煤粉经济细度 1.2 倍,设超过煤粉细度上限时间为  $T_4$ 。

### 3.2.4 补装球周期计算

电厂运行过程中,应综合考虑钢球损耗、磨煤机功率、最大出力以及煤粉细度变化,即补装球周期为:

$$T_g = \min(T_1, T_2, T_3, T_4) \quad (28)$$

#E 磨平均出力为 45.3 t/h, 则:

$$T_1 = \frac{0.05G_m}{Y_2 B_m} \times 10^6 = \frac{0.05 \times 45}{44.67 \times 45.3} \times 10^6 \text{ h} = 1111.91 \text{ h}$$

磨煤机功率降低  $\Delta P_{\max}$  对应时间  $T_2 = 1\ 082.2 \text{ h}$ 。

#E 磨装载量对最大出力修正公式为:

$$f_G = \left( \frac{G_{\text{on}}}{G_b} \right)^{0.6} \quad (29)$$

式中:  $G_b$  为最大钢球装载量,  $G_b = 58.2 \text{ t}$ 。

当磨煤机最大出力降低至  $B_m$  时,装载量降低至  $G_{\min}$ , 则:

$$G_{\min} = G_b \left( \frac{B_m}{B_{\max}} \right)^{\frac{5}{3}} = 58.2 \times \left( \frac{45.3}{56.27} \right)^{\frac{5}{3}} \text{ t} = 40.547 \text{ t} \quad (30)$$

因此可求得  $T_3$  为:

$$T_3 = \frac{G_m - G_{\min}}{B_m Y_2} \times 10^6 = 2\ 200.59 \text{ h} \quad (31)$$

在一个补装球周期内,未发现煤粉细度长期超标现象,故  $T_4 = \infty$ 。

综上所述,  $T_g = 1\ 082.2 \text{ h}$ 。

钢球补充量  $G_g$  为:

$$G_g = Y_2 B_m T_g = 2.189\ 9 \text{ t} \quad (32)$$

### 3.3 补装球的级配计算

钢球的磨损引起各级钢球直径逐渐减小,直径和质量比例发生改变甚至失调,导致磨煤机制粉效率降低。这种失调可通过对补装球级配的调整进行改善。#B 磨仅补装  $\varphi 50$  钢球的方法导致级配严重偏离,降低了磨煤机研磨效率。

设#E 磨初装球级配为:

$$\{x\} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}^T = \{10, 10, 15, 30, 35\}^T \quad (33)$$

#E 磨连续运行  $t$  小时后,取出少量钢球并按重量进行分级,测定各级别钢球总重,即可得出磨煤机筒内剩余钢球的级配。所得结果如表 4 所示。

表 4 #E 磨磨损钢球试验级配结果

Tab. 4 Results of experiments of steal balls abrasion of #E coal mill

尺寸/mm	$\varphi 60 \sim 50$	$\varphi 50 \sim 40$	$\varphi 40 \sim 30$	$\varphi 30 \sim 25$	$\varphi 25$ 以下
级配%	9.780	9.816	15.031	30.102	35.271

根据表4数据可得运行时间  $T_g$  后, 磨煤机筒内剩余钢球级配向量  $\{y(t)\}$  为:

$$\{y(t)\} = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5\}^T = \{9.780, 9.816, 15.031, 30.102, 35.271\}^T \quad (34)$$

设  $P_{ij}(t)$  为表示筒内各级钢球分布变化规律的矩阵, 则钢球级配变化的数学模型为:

$$\{y(t)\} = P_{ij}(t)\{x\} \quad (35)$$

或可表示为:

$$\{P_{ij}(t)\} = \{y(t)\} \times pinv\{x\} \quad (36)$$

磨煤机经过时间  $T_g$  的连续运行后, 第  $\omega$  级钢球磨损量为<sup>[17]</sup>:

$$\Delta G_{on\omega} = \Delta G_{on} \left[ x_{\omega 0} - \sum_{j=1}^{\omega} P_{ij}(t) \cdot x_j \right] \quad (37)$$

则应补装球量为  $\Delta G_{on}$  为:

$$\Delta G_{on} = \sum_{\omega=1}^n \Delta G_{on\omega} \quad (38)$$

(1) 当  $\Delta G_{on} - \sum_{\omega=1}^{j-1} \Delta G_{on\omega} \leq 0$  时,

第  $j$  级别钢球补装量为:

$$\Delta G_{gj} = 0 \quad (39)$$

(2) 当  $0 < \Delta G_{on} - \sum_{\omega=1}^{j-1} \Delta G_{on\omega} \leq \Delta G_{onj}$  时,

第  $j$  级别钢球补装量为:

$$\Delta G_{gj} = \Delta G_{on} - \sum_{\omega=1}^j \Delta G_{on\omega} \quad (40)$$

(3) 当  $\Delta G_{on} - \sum_{\omega=1}^{j-1} \Delta G_{on\omega} > \Delta G_{onj}$  时,

第  $j$  级钢球补装量为:

$$\Delta G_{gj} = \Delta G_{onj} \quad (41)$$

补装球后第  $j$  级钢球级配变为:

$$x_{gj} = x_j - \Delta G_{onj} / G_m + \Delta G_{gj} / G_m \quad (42)$$

在实际运行过程中, 大钢球会逐渐磨损为小钢球, 多加小球增加了补球频率, 增加了操作和管理难度。在补装球过程中本着以下原则:

(1) 优先补充大钢球, 补装球后的钢球级配应更加合理;

(2) 补装球后的有效钢球量等于初装球量。

应对补装球级配进行修正, 则#E 磨实际补球参数如表5所示。

### 3.4 经济效益分析

根据表3中补装球记录和电厂运行数据, 假设#B 磨每一补球周期功率成线性下降, 则运行过程中的平均功率 1 427.3 kW, 运行电流约为 162.13 A, 则#B 磨磨煤电耗为:

$$e_1 = \frac{\overline{P_m}}{B_m} = \frac{1\,427.3\text{ kW}}{43.2\text{ t/h}} = 33.04\text{ kW} \cdot \text{h/t} \quad (43)$$

每个  $\varphi 50$  钢球质量为 0.514 kg, 中铬钢球价格为 3 600 元/t, 电价为 0.48 元/kW·h。因此#B 磨电耗与钢耗为:

$$P_B = \frac{43.2 \times 33.04 \times 0.48 \times 497.3 + 3600 \times 0.514 \times 7}{497.3} = 706.82\text{ 元/h}$$

表5 补装球计算参数表

Tab. 5 Table of computing supplement of steel balls

参数	钢球分级数				
	1	2	3	4	5
钢球规格/mm	$\varphi 60$	$\varphi 50$	$\varphi 40$	$\varphi 30$	$\varphi 25$
首次装球比例	0.100	0.100	0.150	0.300	0.350
各级钢球缺损量 $\Delta G_{onk}/t$	0.314 0	0.298 8	0.316 7	0.616 3	0.654 0
磨损后级配	0.098	0.098	0.150	0.301	0.353
钢球缺损总量 $\Delta G_{on}/t$			2.189 9		
理论各级钢球补装量 $\Delta G_g/t$	0.314 0	0.298 8	0.316 7	0.616 3	0.654 0
实际各级钢球补充量 $\Delta G_g/t$	0.739 8	0.704 0	0.746 6	0	0
补球后级配	0.109	0.109	0.160	0.286	0.335

#E 磨补装球前功率为 798.2 kW, 电流为 119.4 A; 按照表 5 中级配补装球后运行功率为 830.56 kW, 运行电流为 122.27 A。#E 磨磨煤电耗为:

$$e_2 = \frac{P_m}{B_m} = \frac{814.35\text{kW}}{45.3\text{t/h}} = 17.98 \text{ kWh/t} \quad (44)$$

铬锰锌钢球价格为 17 600 元/t, 则#E 磨电耗和钢耗为:

$$P_E = \frac{45.3 \times 17.98 \times 0.48 \times 1082.2 + 17\,600 \times 2.189\,9}{1082.2} =$$

$$426.57 \text{ 元/h}$$

#E 磨经改造后, 磨煤电耗比#B 磨降低 15.06 kW·h/t, 成本节约 280.25 元/h, 大大提升运行的经济效益。

## 4 结论

通过对双进双出钢球磨煤机钢球的磨损的研究, 以及某电厂#2 机组#B 磨、#E 磨进行的初装球和补装球的运行试验得到以下结论:

1) 在构建双进双出钢球磨煤机运动模型基础上, 建立了钢球机械磨损数学模型, 求得钢球磨损系数  $k$  用以表示磨损速率, 对钢球损耗率的预测、稳定装载量和提高磨煤机运行效益具有重要意义。

2) 以#2 机组两台 BBD-4366 型双进双出磨煤机为例进行运行试验, #B 磨采取传统方法初装球和补装球, #E 磨采用少球改造初装球, #E 磨运行功率明显低于#B 磨。

3) 综合钢球磨损导致的功率、最大出力和煤粉细度的影响, 提出了一种精准确定补球周期的方法, 根据运前后钢球级配变化计算出磨损稳态特性矩阵, 并以此确定合理补装球级配。通过运行数据可知, #E 磨煤电耗比#B 磨降低 15.06 kWh/t, 成本节约 280.25 元/h, 显著提高了电厂运行经济效益, 对于今后双进双出磨煤机初装球和补装球操作具有指导意义。

## 参考文献:

[1] 高建强, 孙少东. 300 MW 褐煤富氧燃烧锅炉制粉系

统仿真模型的研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(2): 437-444.

Gao Jianqiang, Sun Shaodong. Study on Pulverizing System Simulation Model of 300 MW Lignite Oxygen-enriched Combustion Boiler[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(2): 437-444.

[2] 孙灵芳, 孙晶淼. 球磨机制粉系统建模及广义预测控制的研究与应用[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(6): 1329-1337.

Sun Lingfang, Sun Jingmiao. Study of Improved Generalized Predictive Control in Ball Mill Application[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1329-1337.

[3] Makokha A B, Moys M H, Couvas C, et al. Steady state inferential modeling of temperature and pressure in an air-swept coal pulverizing ball mill[J]. Powder Technology (S0032-5910), 2009, 192(3): 260-267.

[4] 苏凯, 刘吉臻, 牛玉广. 考虑直吹式钢球磨电耗的厂级负荷优化分配[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(2): 24-30.

SU Kai, LIU Jizhen, NIU Yuguang. Load Distribution of Thermal Power Plants Considering Electricity Consumption of Direct Feeding Steel Ball Mills[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(2): 24-30.

[5] 段希祥, 周平, 潘新潮. 球磨机精确化装补球方法[J]. 有色金属工程, 2004, 56(3): 75-78.

DUAN Xixiang, ZHOU Ping, PAN Xinchao. Accurate Method for Ball Load and Addition in Mill[J]. NONFERROUS METALS, 2004, 56(3): 75-78.

[6] 谢恒星, 王玉林, 曾毅, 等. 钢球磨损动力学模型的建立[J]. 武汉化工学院学报, 1993(1): 1-7.

XIE Hengxing, WANG Yulin, ZENG Yi, et al. The Establishment Of Dynamic Model Of Steel Ball Wear[J]. Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology, 1993(1): 1-7.

[7] 岳峻峰, 肖杰, 秦鹏, 等. 双进双出磨煤机降低磨煤电耗试验研究[J]. 热能动力工程, 2011, 26(3): 354-357, 377.

YUE Junfeng, XIAO Jie, QIN Peng, et al. Experimental Study of a Dual Inlet and Outlet Coal Mill for Reducing Its Milling Power Consumption[J]. Journal of Engineering For Thermal And Power, 2011, 26(3): 354-357, 377.

[8] 刘正雄. 基于差分进化的铝土矿磨矿分级过程非线性参数辨识[D]. 长沙: 中南大学, 2014.

LIU Zhengxiong. Nonlinear Parameter Identification Method in Grinding Classification Process of Bauxite

- Based on Differential Evolution[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [9] Bwalya M M, Moys M H, Finnie G J, et al. Exploring ball size distribution in coal grinding mills[J]. Powder Technology (S0032-5910), 2014, 257(5): 68-73.
- [10] Wang Y, Ma Z, Shen Y, et al. A power-saving control strategy for reducing the total pressure applied by the primary air fan of a coal-fired power plant[J]. Applied Energy (S0306-2619), 2016, 175: 380-388.
- [11] 何芳, 白焰, 张然. 球磨机运动动能与存煤量的 DEM 试验研究[J]. 动力工程学报, 2014, 34(8): 639-645.  
HE Fang, BAI Yan, ZHANG Ran. DEM Experimental Study on Kinetic Energy and Coal Storage of Ball Mills[J]. Journal Of Chinese Society Of Power Engineering, 2014, 34(8): 639-645.
- [12] 袁哲. 球磨机磨矿介质运动分析与参数优化[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2008.  
YUAN Zhe. The Motion Analysis of Grinding Medium and the Optimization of Parameters on the Ball Mill[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2008.
- [13] 魏勇. 磨矿过程中钢球磨损规律研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.  
WEI Yong. Wear Laws of Steel Bails in Grinding[D]. Shenyang: Northeastern University, 2006.
- [14] Golyshev L V, Mysak I S. The method for determining the ball load and the grinding capacity of a ball-tube mill from the power consumed by its electric motor[J]. Thermal Engineering (S1359-4311), 2012, 59(8): 589-592.
- [15] 李锋, 罗嘉, 高珊, 等. 锅炉入炉煤水分质量分数在线软测量[J]. 动力工程学报, 2014, 34(7): 512-517.  
LI Feng, LUO Jia, GAO Shan, et al. Online Soft Sensing of Coal Moisture for Utility Boilers[J]. Journal Of Chinese Society Of Power Engineering, 2014, 34(7): 512-517.
- [16] 张安国, 梁辉. 电站锅炉煤粉制备与计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 16-18.  
ZHANG Anguo, LIANG Hui. Coal preparation and calculation of boiler[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011: 16-18.
- [17] 綦守荣, 焦嵩明, 韩璞, 等. 磨煤机钢球磨损的一般数学模型研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2008, 35(2): 74-78.  
QI Shourong, JIAO Songming, HAN Pu, et al. The research of general mathematical model of the steel ball wear and tear in ball mill[J]. Journal Of North China Electric Power University, 2008, 35(2): 74-78.

## 《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 发布了 2017 版《中国学术期刊国际引证年报》, 《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”。

《年报》(2017 版)采用的统计源期刊为 20192 种, 涵盖 WoS 收录的 SCI 期刊 8874 种、SSCI 和 A&HCI 期刊 4645 种, ESCI 期刊 5578 种; 增补期刊 1762 种。参照中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 计算期刊影响力指数(CI), 对国内 6210 种学术期刊排序, 遴选了人文社科、自然科学与工程技术两个类别的 TOP10%为国际影响力品牌学术期刊。TOP5%以内的期刊为“最具国际影响力学术期刊”、TOP5-10%之间的为“国际影响力优秀学术期刊”。